This is a digital copy of a book that was preserved for generations on library shelves before it was carefully scanned by Google as part of a project to make the world's books discoverable online.

It has survived long enough for the copyright to expire and the book to enter the public domain. A public domain book is one that was never subject to copyright or whose legal copyright term has expired. Whether a book is in the public domain may vary country to country. Public domain books are our gateways to the past, representing a wealth of history, culture and knowledge that's often difficult to discover.

Marks, notations and other marginalia present in the original volume will appear in this file - a reminder of this book's long journey from the publisher to a library and finally to you.

Usage guidelines

Google is proud to partner with libraries to digitize public domain materials and make them widely accessible. Public domain books belong to the public and we are merely their custodians. Nevertheless, this work is expensive, so in order to keep providing this resource, we have taken steps to prevent abuse by commercial parties, including placing technical restrictions on automated querying.

We also ask that you:

+ *Make non-commercial use of the files* We designed Google Book Search for use by individuals, and we request that you use these files for personal, non-commercial purposes.
+ *Refrain from automated querying* Do not send automated queries of any sort to Google's system: If you are conducting research on machine translation, optical character recognition or other areas where access to a large amount of text is helpful, please contact us. We encourage the use of public domain materials for these purposes and may be able to help.
+ *Maintain attribution* The Google "watermark" you see on each file is essential for informing people about this project and helping them find additional materials through Google Book Search. Please do not remove it.
+ *Keep it legal* Whatever your use, remember that you are responsible for ensuring that what you are doing is legal. Do not assume that just because we believe a book is in the public domain for users in the United States, that the work is also in the public domain for users in other countries. Whether a book is still in copyright varies from country to country, and we can't offer guidance on whether any specific use of any specific book is allowed. Please do not assume that a book's appearance in Google Book Search means it can be used in any manner anywhere in the world. Copyright infringement liability can be quite severe.

About Google Book Search

Google's mission is to organize the world's information and to make it universally accessible and useful. Google Book Search helps readers discover the world's books while helping authors and publishers reach new audiences. You can search through the full text of this book on the web at `http://books.google.com/`

GODFREY LOWELL CABOT SCIENCE LIBRARY
of the Harvard College Library

This book is
FRAGILE
and circulates only with permission.
Please handle with care
and consult a staff member
before photocopying.

Thanks for your help in preserving
Harvard's library collections.

Digitized by Google

Digitized by Google

Digitized by Google

Digitized by Google

Digitized by Google

Digitized by Google

LA

MACHINE DE GRAMME

Digitized by Google

Paris. — Imp. Gauthier-Villars, 55, quai des Grands-Augustins.

Digitized by Google

ACTUALITÉS SCIENTIFIQUES.

LA MACHINE DE GRAMME

SA THÉORIE ET SA DESCRIPTION

PAR

ANTOINE BREGUET

Directeur de la *Revue scientifique.*

PARIS

GAUTHIER-VILLARS, IMPRIMEUR-LIBRAIRE

DU BUREAU DES LONGITUDES, DE L'ÉCOLE POLYTECHNIQUE

SUCCESSEUR DE MALLET-BACHELIER

Quai des Augustins, 55

1880

(Tous droits réservés.)

Digitized by Google

~~V. 1555~~
Eng 4038.80
OCT 31 1883
Sayre fund.

Digitized by Google

LA

MACHINE DE GRAMME

SA THÉORIE ET SA DESCRIPTION

INTRODUCTION

Il ne faut pas confondre les découvertes avec les inventions. Celles-ci sont seulement des applications des premières, mais il arrive souvent qu'elles leur cèdent peu en importance, au point de vue des résultats. Une découverte qui ne donnerait pas lieu à des inventions, reste, sinon inutile, du moins stérile, tandis qu'une invention donne toujours un nouvel éclat à la découverte dont elle découle.

Les piles sont venues à la suite de la pile à colonne de Volta; les premières machines magnéto-électriques, à la suite de l'expérience de Lenz; la télégraphie est née des observations d'Œrsted et d'Arago;

Digitized by Google

la bobine d'induction a été une conséquence des travaux de Faraday.

Les télégraphes appartiennent, à vrai dire, plutôt au domaine de la Mécanique qu'à celui de la Physique, aussi ne doit-on comparer la machine de Gramme qu'aux inventions purement électriques, comme la machine de Pixii et la bobine d'induction, laissant de côté la pile de Volta, qui constitue à la fois une découverte et une invention.

On peut affirmer alors que Gramme occupe le premier rang parmi les inventeurs qui ont illustré la science de l'électricité avant l'apparition du téléphone.

Sans chercher à rabaisser la machine de Pixii, il est pourtant permis de dire qu'elle découle si directement de l'expérience fondamentale de Lenz qu'elle n'en est qu'une forme particulière et qu'il était naturel qu'un esprit ingénieux eût l'idée de la réaliser. La machine de Clarke constitue à peine une invention, tant est petite la différence qui la sépare de la précédente.

Pour la bobine d'induction, il est impossible de nier qu'elle ne soit une invention vraiment originale; mais on doit ajouter qu'elle constitua une sorte d'invention collective. Sous sa première forme, que lui avaient donnée ses auteurs, MM. Masson et Breguet, elle ne fournissait que de bien courtes étincelles, et c'est grâce à M. Fizeau, qui lui adjoignit un condensateur, et à Foucault, qui y ajouta

Digitized by Google

son interrupteur, que la bobine d'induction put atteindre la forme définitive sous laquelle elle prit le nom de bobine Ruhmkorf, du nom de son constructeur.

La machine de Gramme se présente tout autrement. En étudiant sa théorie exacte et sa disposition si complexe, il faut admettre chez son inventeur une sorte de divination. Et l'admiration augmente lorsque l'on songe que cette machine est sortie absolument parfaite des mains de M. Gramme, et cela dès son origine. Je ne sache pas, en effet, un seul perfectionnement sérieux qui ait été apporté à cette machine depuis son début dans l'industrie, début qui a suivi de deux années à peine sa réalisation première.

La machine de Gramme a été la cause d'une véritable révolution industrielle, qui ne semble pas même aujourd'hui près de se terminer. Cette machine a permis pour la première fois de fournir de la lumière électrique à des conditions de prix souvent inférieures à celles du gaz, et, en tout cas, avec une abondance et un éclat qu'on a été parfois jusqu'à lui reprocher.

La lampe Serrin, cette merveille de mécanisme, n'a pris son franc essor que du jour où elle a pu s'atteler à l'appareil Gramme.

La Galvanoplastie a renouvelé ses procédés, en mettant de côté ses bataillons de piles à acides, si encombrants et d'un entretien si onéreux.

Digitized by Google

La Photographie commence à utiliser la nouvelle lumière. On parle même de transporter la force à distance, en mettant à profit la réversibilité des machines magnéto-électriques.

Mais notre but n'est pas de parler ici des applications de la machine de Gramme; nous voulons seulement la décrire et en présenter la théorie, ou plutôt, afin de suivre un ordre plus logique et passer du simple au composé, nous exposerons sa théorie d'abord et sa description ensuite.

Je commencerai par rappeler en premier lieu les principes fondamentaux de l'électro-dynamique, puis ceux de l'électro-magnétisme, et, par une série d'appareils rudimentaires, on se trouvera conduit tout naturellement à la machine de Gramme et à celles du même genre.

J'ai eu la bonne fortune de donner la première théorie exacte de cette machine, au mois de janvier 1878, dans les *Annales de Chimie et de Physique;* le lecteur me permettra d'avoir souvent recours à ce travail, d'ailleurs fort élémentaire. La méthode dont je me suis servi pour faire l'étude comparée des courants et des aimants n'est pas celle de notre illustre compatriote Ampère, mais celle de Faraday, qui m'a semblé plus commode et d'un usage plus facile. Je compte justifier cette préférence, lorsque j'en aurai fait comprendre l'emploi.

Digitized by Google

I

ÉTUDE COMPARÉE

DES AIMANTS ET DES COURANTS

Les phénomènes magnétiques et les phénomènes électriques se rattachent les uns aux autres par certains rapports, par certain liens qui ont été étudiés pour la première fois par Ampère, à la suite de la célèbre découverte d'Œrsted.

C'est Ampère, en effet, qui le premier a réussi à établir qu'un système de courants peut, dans tous les cas, remplacer un système d'aimants, bien que le théorème réciproque ne soit pas vrai.

Les aimants et les courants partagent donc un certain nombre de propriétés, et c'est précisément de ces propriétés communes, considérées en elles-mêmes et dans leurs rapports, que va traiter la première partie du présent travail.

Je rappellerai d'abord les propriétés des aimants.

Je m'occuperai ensuite de celles des courants.

Digitized by Google

Après avoir ainsi fait deux études distinctes de ces propriétés, je serai naturellement conduit à comparer entre eux les aimants et les courants, à les examiner dans leurs effets, dans leurs réactions mutuelles, ce qui me mettra à même d'entreprendre l'analyse des éléments plus complexes qui constituent les machines magnéto-électriques.

I. — Aimants.

1. Il est facile de constater qu'un barreau aimanté exerce autour de lui une action d'un genre particulier. Lorsqu'on en approche une aiguille en acier ou en fer, cette aiguille prend une position d'équilibre bien déterminée pour chacun des points de l'espace. Les oscillations plus ou moins rapides qui animent l'aiguille avant que cet équilibre soit atteint témoignent de la grandeur de la force en chaque point. Si les oscillations sont courtes et rapides, c'est que la force est considérable: si elles sont longues et lentes, c'est que la force est peu intense. L'expérience montre ainsi que, plus on s'éloigne du barreau, plus la force diminue.

Cet espace indéfini qui environne l'aimant a reçu le nom de champ magnétique. On exprime simplement par là que, dans ce champ, dans cet espace, existent des influences magnétiques. On peut encore dire qu'un champ magnétique est un

Digitized by Google

espace en chaque point duquel une aiguille aimantée librement suspendue ne se trouve pas en équilibre indifférent.

Les constantes d'un champ magnétique se réduisent à la grandeur et à la direction de la force en chaque point.

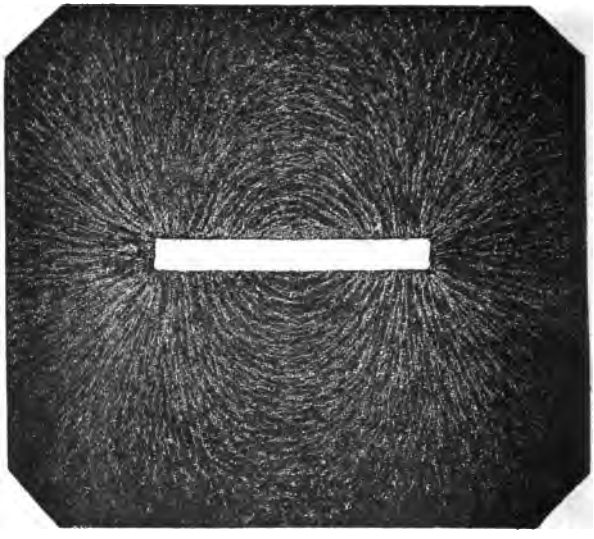
Comme je l'ai dit, la grandeur de la force peut se déterminer par la méthode d'oscillation ; la direction de cette force est donnée par celle de l'aiguille, lorsque celle-ci a atteint sa position définitive d'équilibre.

2. Afin d'explorer d'une manière complète un champ magnétique, il faut mesurer ses constantes en chacune de ses régions. Pour y parvenir, on pourrait employer un grand nombre d'aiguilles mobiles de petites dimensions; on les placerait autour de l'aimant et l'on aurait ainsi une sorte de vue d'ensemble des propriétés particulières du champ. C'est là une méthode fort logique, qu'il est possible de perfectionner notablement en remplaçant les aiguilles mobiles par de simples grains de limaille de fer. La *fig.* 1, qui n'est autre chose que la reproduction photographique d'une véritable expérience, montre que chacun de ces petits grains s'oriente oomme l'aiguille de fer, lorsque, par quelques trépidations données au papier, la limaille arrive à vaincre la résistance due au frottement. Les figures ainsi formées ont reçu le nom de *fantômes magnétiques* Elles ont été réalisées

Digitized by Google

pour la première fois par W. Gilbert, médecin de la reine Élisabeth. Ces lignes courbes suivant lesquelles se rangent les grains de fer indiquent en chacun de leurs points la direction de la force.

Fig. 1.



C'est pour cette raison que Faraday les a appelées *lignes de force* (¹).

(¹) Faraday définit la ligne de force : la ligne que décrit une très petite aiguille aimantée, déplacée dans la direction de sa longueur de manière à toujours rester tangente à sa ligne de déplacement; en d'autres termes, c'est l'enveloppe des diverses positions de l'aiguille. (Faraday, *Experimental researches in Electricity*, t. III, p. 328.)

Digitized by Google

3. Les lignes de force semblent prendre naissance dans le voisinage des extrémités de l'aimant; elles s'épanouissent dans diverses directions et retournent toujours à l'extrémité opposée à celle d'où elles sont parties. Il convient d'admettre que ces lignes se prolongent et se referment à travers la masse intérieure du barreau. Les lignes de force sont donc toujours des *courbes fermées*, d'après cette dernière convention. En outre, elles n'ont pas seulement une direction, mais un sens, car elles possèdent des qualités opposées dans des directions opposées, comme on le verra plus loin.

4. Pour affecter des formes si inattendues, si particulières, il est évident que les lignes de force doivent obéir à de certaines lois. Ces lois ont été indiquées par Faraday. Elles sont au nombre de deux :

Première loi de Faraday. — *Toute ligne de force tend toujours à être aussi courte que possible.* — Cette loi exprime que l'on doit se figurer une ligne de force comme un fil élastique, dont les deux points d'attache sont ceux où elle pénètre dans la masse de l'aimant. Cette ligne tendrait donc naturellement à coïncider avec la droite qui réunit ces points d'attache; mais, si cette première loi existait seule, toutes les lignes de force seraient rectilignes, tandis que l'expérience les a montrées courbes. C'est qu'en effet, une seconde loi vient s'opposer en partie aux effets de la première.

Digitized by Google

Cette seconde loi peut s'énoncer ainsi :

Deuxième loi de Faraday. — *Deux lignes de force parallèles et de même force se repoussent.* — Alors, puisque deux lignes parallèles se repoussent, il est naturel qu'elles s'écartent l'une de l'autre en vertu de leur élasticité, et qu'elles prennent cette forme arquée que les fantômes ont révélée.

5. Avant d'étudier les conséquences de ces deux premières lois et de les vérifier sur un certain nombre d'exemples, je vais indiquer une troisième loi que révèle encore le simple aspect des lignes de force.

Au lieu de prendre le fantôme magnétique d'un aimant horizontal, je vais considérer le fantôme que l'on obtiendrait dans un plan mené perpendiculairement au barreau dans le voisinage de ses extrémités.

Ici, toutes les lignes de force rayonneraient en ligne droite à partir de l'aimant, et, si l'on imagine que cette extrémité de l'aimant soit isolée et séparée du reste du barreau, on conçoit que les lignes de force rayonneraient, non seulement dans le plan de la figure, mais encore dans toutes les directions de l'espace, comme font les rayons d'une source lumineuse.

Troisième loi. — *Le nombre de lignes de force qui passent en chaque point est proportionnel à la grandeur de la force en ce point.*

En effet, on sait par expérience que l'intensité

Digitized by Google

de la force magnétique décroît en raison inverse du carré de la distance, et c'est une propriété qu'il est aisé de vérifier à l'aide d'une aiguille mobile, par la méthode des oscillations.

Or, par suite du rayonnement des lignes de force, leur nombre, sur une surface sphérique constante (le centre de la sphère coïncidant avec le centre d'émission magnétique), décroît en raison inverse du carré du rayon, ce qui constitue sous une autre forme l'énoncé de la troisième loi.

On pourrait reprocher justement à l'expression de *nombre de lignes de force* de n'être pas suffisamment correcte, car il serait impossible de fixer l'unité de ligne de force. Mais c'est là une forme de langage que nous emploierons pourtant, en raison de sa commodité, bien qu'il ne soit pas plus correct de parler de nombre de lignes de force que de nombre de filets liquides dans un cours d'eau.

6. En résumé :

1° La ligne de force est donnée en un point par la direction et le sens de la position d'équilibre d'une aiguille aimantée infiniment courte et réduite à son axe magnétique ;

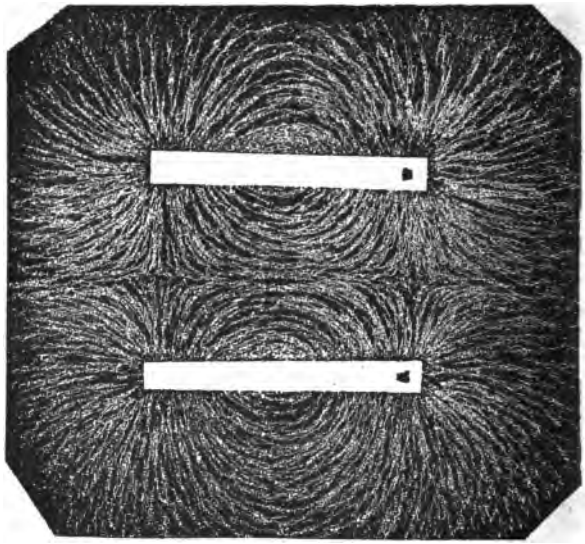
2° L'intensité en un point du champ est représentée par la densité des lignes de force en ce point, c'est-à-dire par le rapport du nombre des lignes de force qui coupent un petit cercle décrit autour du point comme centre à la surface de ce cercle, lorsque celle-ci tend à devenir nulle.

Digitized by Google

On sait maintenant tout ce qu'il est nécessaire de connaître sur les lignes de force pour prévoir la majeure partie des phénomènes magnétiques.

Quelques exemples serviront à vérifier la grande fécondité de cette manière de voir.

Fig. 2.



7. La *fig.* 2 représente deux aimants parallèles et de même sens. On saupoudre le plan sur lequel ils reposent de limaille de fer. Tout à l'heure (*fig.* 1), le champ magnétique était le même de part et d'autre de l'aimant. Ici, il ne présente pas la même symétrie. Les arcs qui se trouvent au-dessus de

Digitized by Google

l'aimant supérieur s'étendent plus loin que les arcs inférieurs, et ce sont les lignes de force du second aimant qui repoussent celles du premier, les concentrent dans un espace relativement resserré et accroissent, par conséquent, leur densité dans cette région.

Et puisque nous savons que deux lignes de force parallèles et de même sens se repoussent, nous en concluons que les deux aimants, dont les lignes de force sont solidaires, ont une tendance à s'écarter l'un de l'autre, à se repousser.

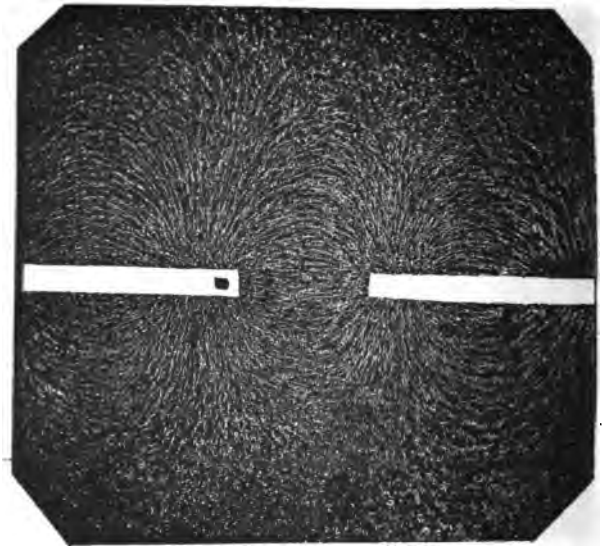
8. Passons à un second exemple. Voici deux aimants dont les extrémités contraires se font vis-à-vis (*fig.* 3). Les directions de leurs lignes de force intérieures se trouvent dans le prolongement l'une de l'autre. Il est alors tout naturel que deux lignes qui appartiennent chacune à un aimant différent se réunissent pour faire route ensemble, en vertu de la première loi; mais cela, à la condition que leur nouvelle longueur soit plus courte que la somme de leurs longueurs primitives. C'est ce qui nous explique pourquoi, dans cette figure, un certain nombre de lignes de force se ferment sur un seul barreau, tandis qu'il en est d'autres qui traversent les deux barreaux de part en part.

Nous pouvons maintenant comprendre en vertu de quoi et dans quelles conditions deux aimants s'attirent ou se repoussent. S'ils s'attirent, c'est pour rendre encore plus courtes les lignes de force

Digitized by Google

qui les réunissent l'un à l'autre. S'ils se repoussent, c'est pour résister à la déformation que chacun d'eux fait subir aux lignes de force de l'autre. Ainsi, selon les directions relatives de leurs lignes

Fig. 3.



de force, on obtiendra une attraction ou une répulsion.

9. Une autre expérience va fournir un exemple d'attractions et répulsions combinées. Dans un vase rempli d'eau, flottent de petites aiguilles verticales, supportées par des morceaux de liège. Ces aiguilles sont aimantées et disposées de manière à

Digitized by Google

se repousser toutes les unes des autres. Au-dessus du centre du vase, on place un aimant, qui, lui, attirera tous les flotteurs. Sous son influence, ceux-ci vont chercher à se placer au milieu du liquide, pour être aussi près que possible de l'aimant. Mais leurs répulsions réciproques les en empêchent, si bien que, suivant leur nombre, ils présenteront des figures caractéristiques différentes. *Deux* aiguilles se placeront de part et d'autre du centre, *trois* formeront un triangle équilatéral, *quatre* un carré, *cinq* un pentagone, et ainsi de suite. C'est là une expérience curieuse et facile à répéter pour tout le monde.

II. — Courants.

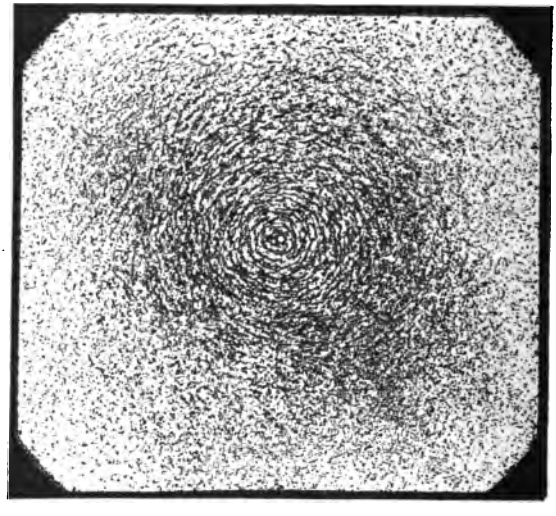
10. Dans cette première partie, on a compris le rôle des lignes de force pour ce qui regarde le magnétisme des aimants. Il nous reste à présent à mettre en évidence le magnétisme des courants, afin de pouvoir examiner les actions qui s'exercent entre les uns et les autres, entre les aimants et les courants.

Les fantômes magnétiques des courants diffèrent de ceux que l'on vient de voir. Que l'on jette de la limaille de fer autour d'un conducteur vertical traversé par un courant, et l'on verra aussitôt cette limaille se disposer en circonférences concentriques autour du fil (*fig.* 4). Ce sont bien là des lignes de

Digitized by Google

force; il est donc établi qu'un courant exerce des actions magnétiques. Ici, les lignes de force sont des courbes fermées, et ne sont interrompues par aucune substance solide. Leurs propriétés sont

Fig. 4.



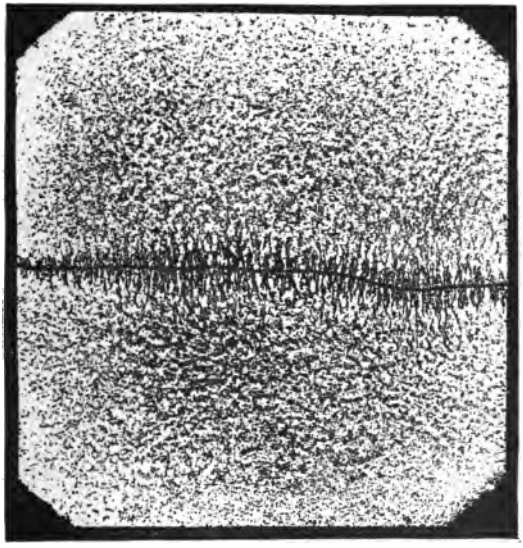
identiques à celles des lignes de force des aimants. Elles obéissent aux mêmes lois.

11. Si le courant, au lieu d'être vertical, est parallèle au plan du tableau, les lignes de force obtenues dans ce cas coupent toutes le conducteur à angle droit; ce sont les projections, les profils des circonférences de tout à l'heure (*fig.* 5). Or, nous savons que les lignes de force parallèles se repous-

Digitized by Google

sent; nous devons en conclure que le courant est sollicité à s'allonger. C'est là une des propriétés des courants qui a été découverte par Ampère et que nous venons de retrouver par un autre procédé.

Fig. 5.

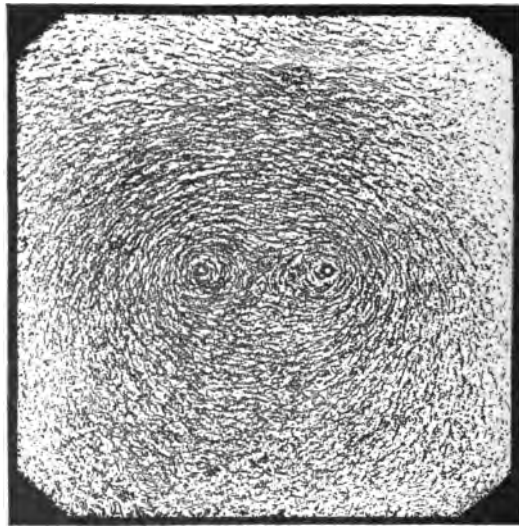


12. Examinons maintenant l'influence de deux courants voisins et parallèles. S'ils sont de même direction, leur fantôme magnétique est celui de la *fig.* 6. Les lignes de force de ces deux courants trouvent avantage à se réunir et à faire route ensemble, tant que la longueur de cette nouvelle

Digitized by Google

courbe est inférieure à la somme des deux circonférences que chacune d'elles décrirait autour de son propre conducteur en l'absence de l'autre. Il convient de remarquer que cette courbe qui enveloppe les deux courants tend, d'après nos principes

Fig. 6.



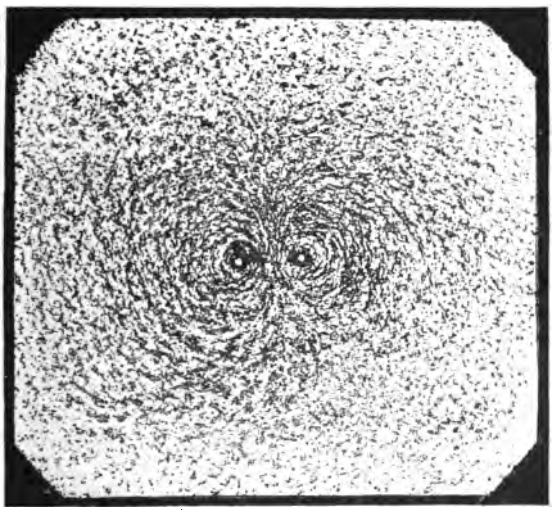
fondamentaux, à se raccourcir, c'est-à-dire à se contracter. Par conséquent, si les deux conducteurs sont libres de se mouvoir, ils marcheront l'un vers l'autre, ils s'attireront.

13. Si au contraire les courants sont de direction opposée, ce sont des lignes de force de

Digitized by Google

même sens qui se trouvent en présence (*fig.* 7). D'après le second principe de Faraday, ces lignes se repoussent, et par cette raison les deux conducteurs ont tendance à s'écarter l'un de l'autre; ils se repoussent. Nous avons ainsi retrouvé, par la con-

Fig. 7.



sidération des lignes de force, les célèbres propositions d'Ampère :

Deux courants parallèles et de même sens s'attirent.

Deux courants parallèles et de sens contraire se repoussent.

Digitized by Google

14. On n'aura pas grand'peine à admettre que les lignes de force aient d'autant plus de facilité à se former qu'elles se trouveront comprises dans des milieux plus magnétiques. Il faut en conclure que le même courant qui mettrait en liberté 100 lignes de force dans l'air, en dégagerait, si je puis employer ce terme, un bien plus grand nombre si ces lignes pouvaient se loger en tout ou en partie dans une masse de fer voisine. De là un procédé pour exalter l'intensité d'un champ magnétique produit par une source électrique donnée. On loge dans l'intérieur d'une sorte de bobine constituée par le courant un barreau de fer doux, et c'est la présence de ce fer qui permet au courant de produire une bien plus grande quantité de lignes de force. Celles-ci sont mises à profit pour effectuer des attractions énergiques. Tel est le principe sur lequel repose la construction des électro-aimants, qui rendent tant de services dans toutes les applications de l'électricité.

III.-- Influence réciproque des aimants et des courants.

15. Arrêtons-nous un instant pour mesurer le chemin que nous avons déjà parcouru. Je viens de soumettre l'étude des courants à la même méthode qui m'avait servi pour exposer les propriétés des aimants, et c'est grâce à la considération des lignes de force que j'ai pu le faire. Les mêmes lois m'ont

Digitized by Google

servi dans les deux cas; rien n'a distingué la seconde étude de la première, comme procédé d'investigation. Par là, nous avons été naturellement amenés à nous représenter les courants électriques comme des aimants d'une espèce particulière. On a même pu remarquer que les attractions et les répulsions des courants parallèles et les attractions et les répulsions des aimants étaient respectivement des conséquences immédiates des mêmes principes. — C'est en effet la loi de la contraction d'une ligne de force qui fait marcher l'un vers l'autre deux aimants ainsi que deux courants. — Et c'est la loi de la répulsion des deux lignes de force parallèles qui les oblige à s'écarter les uns des autres.

16. Lorsqu'il s'agit de comparer et d'étudier dans leurs rapports deux phénomènes en apparence dissemblables, ce qu'on doit tout d'abord chercher à leur appliquer, c'est une commune mesure. Il faut donc, à l'aide d'hypothèses convenables et justifiées, envisager ces phénomènes sous un même aspect. C'est ce que les principes de Faraday m'ont permis de faire. Un courant, un aimant n'existe, pour nous, que par ses lignes de force, et à ce titre nous n'aurons pas plus de peine à comparer un aimant et un courant que nous n'en avons eu à comparer les aimants entre eux et les courants entre eux, puisque dans tous les cas cela revient à comparer entre elles des lignes de force.

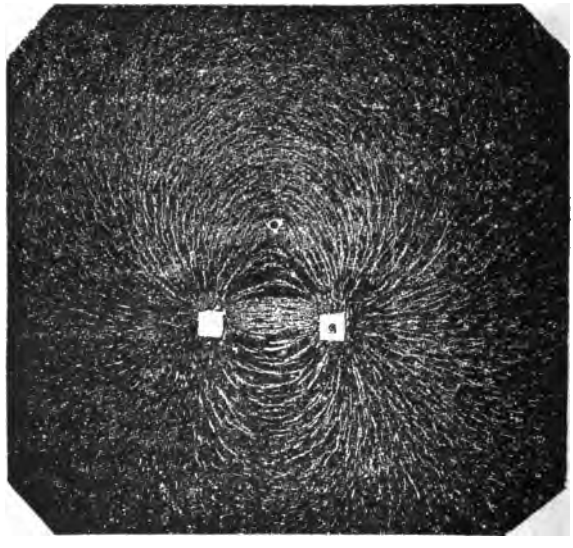
C'est de cette comparaison, c'est de l'influence

Digitized by Google

réciproque des champs magnétiques des courants et des aimants que je vais dès à présent m'occuper.

17. Nous reconnaissons le fantôme de la *fig.* 8; mais à la partie supérieure se trouve un courant perpendiculaire au papier dont il n'a pas été encore

Fig. 8.



question. Ce courant repousse, comme on le voit, au-dessous de lui la plupart des lignes de force de l'aimant, et celles-ci, pour résister à cette déformation, vont alors solliciter le fil conducteur à s'éloigner au-dessous d'elles; puis les nouvelles lignes de force influencées continueront l'effet des pre-

Digitized by Google

mières, si bien que le courant se trouvera sans cesse renvoyé vers le bas de la figure. Au contraire, si le sens du courant était renversé, le déplacement s'effectuerait de bas en haut. Par conséquent, si, à des intervalles de temps convenables, le signe du

Fig. 9.

courant était changé, on verrait le conducteur exécuter une série de mouvements de va-et-vient de part et d'autre de la ligne médiane.

Il est aisé de transformer ce mouvement rectiligne en un mouvement circulaire, comme nous le verrons plus loin.

Digitized by Google

18. Passons à un second exemple de rotation électro-magnétique. Prenons un vase rempli d'eau; au moyen d'un axe métallique central, on fera passer dans le liquide un courant qui le traverse du centre à la circonférence. Nous aurons ainsi comme un rayonnement, comme un épanouissement de courants à partir du centre. Au-dessus du vase et en son milieu, se trouve un aimant vertical. Les lignes de force de l'aimant et celles du courant vont s'influencer, dans ces conditions, de manière à fournir un champ magnétique semblable à celui qui est représenté (*fig.* 9). Ces lignes de force, tordues en spirale, vont chercher à se redresser pour résister à la déformation que leur fait éprouver le courant électrique. La nappe liquide prendra donc un mouvement de rotation sous cette influence. Selon l'extrémité de l'aimant qui se trouve en présence du liquide, le mouvement s'effectuera dans un sens ou dans l'autre.

Les études précédentes ont dû montrer combien la considération des lignes de force présente d'avantages. Si j'avais défini les aimants par leurs pôles, j'aurais été fort embarrassé de dire ce que l'on doit entendre par les pôles d'un courant. Qu'est-ce, en effet, que les pôles d'un aimant? Ce sont les régions où les lignes de force pénètrent dans la masse d'acier et en ressortent. Rien de semblable ne se rencontre dans les courants, puisque les lignes de force sont toutes à l'extérieur du conduc-

Digitized by Google

teur. Un courant n'a donc pas de pôles. Il s'ensuit que la considération des pôles ne fournit pas de trait d'union entre les aimants et les courants. On pourrait, il est vrai, définir les aimants par les courants élémentaires d'Ampère, mais cette méthode n'aurait pas l'avantage de parler aux yeux comme le font les fantômes magnétiques.

Digitized by Google

II

THÉORIE

DE LA MACHINE DE GRAMME

La machine de Gramme est réversible. La rotation de sa bobine donne naissance à un courant électrique, et, réciproquement, si un courant traverse la bobine, cette dernière se mettra à tourner autour de son axe. En raison de cette réversibilité si complète, toute théorie acceptable de la machine, prise comme électromoteur, doit pouvoir se retourner de toutes pièces pour expliquer la machine comme source de courant.

Les démonstrations qui ont généralement cours ne m'ont pas paru remplir ces conditions. Pour expliquer la machine de Gramme en tant que source de courant, on a coutume de supposer sa bobine développée sur un plan, et l'on vérifie alors que, sous cette nouvelle forme, les mêmes phénomènes persistent ; mais l'analyse n'est pas poussée plus loin : on constate, on ne démontre pas.

Digitized by Google

Lorsqu'il s'agit de la machine prise comme électromoteur, voici l'explication la plus ordinaire de son fonctionnement. Par la disposition même des frotteurs, le courant parcourt le circuit de la bobine de manière à développer dans l'anneau de fer un pôle austral (par exemple) à son entrée et un pôle boréal à sa sortie. Ces deux pôles se trouvent soumis à l'action de ceux de l'aimant extérieur et se déplacent pour obéir aux effets connus d'attraction et de répulsion. Rien de plus exact si les prises de courant étaient mobiles avec la bobine; mais les conditions mécaniques de l'appareil ne le permettent justement pas. Dès lors, il est facile de montrer que, si l'anneau tournait en vertu de cette théorie, le principe de la conservation de l'énergie serait infirmé. On pourrait, en effet, réaliser un système auquel s'appliqueraient les mêmes explications, sans dépense aucune d'énergie: il suffirait pour cela de déterminer la même distribution magnétique par l'influence des deux pôles d'un aimant fixe.

J'ajouterai, d'ailleurs, que la précédente manière de voir repose en grande partie sur la participation de l'anneau de fer au mouvement de rotation de la bobine, participation tout à fait indifférente, comme je le montrerai, au jeu de l'appareil.

La machine que présenta Faraday (1831), et que remit en lumière M. Le Roux dans ces dernières années, n'est que la roue de Barlow (1828),

Digitized by Google

sans modifications sensibles. Les machines de Barlow ou de Faraday donnent bien naissance à un courant continu et de même signe sous l'influence d'une rotation continue et de même sens, mais ce courant n'est produit que dans un seul conducteur; sa tension ne dépend donc que de l'intensité du champ magnétique et de la vitesse de rotation, qui ne peuvent acquérir, dans la pratique, que des valeurs insuffisantes à l'obtention d'un courant utilisable. On conçoit que, si plusieurs machines de Faraday étaient associées par leurs pôles de noms contraires, le courant posséderait une tension proportionnelle au nombre de ces machines; mais ce serait là une solution peu élégante et qui exigerait autant de frotteurs qu'il y aurait de machines.

Ce travail aura pour objet d'établir comment la machine de Gramme réalise une première et ingénieuse solution de cet intéressant problème.

Le principe fondamental qui me servira de base est celui de la réaction d'un aimant et d'un conducteur parcouru par un courant. Je commencerai donc par rappeler les expériences les plus simples auxquelles il donne lieu. Sa réversibilité absolue m'autorisera à l'invoquer sous la forme qui me semblera la mieux adaptée aux questions particulières que j'aurai à résoudre, et, lorsque je m'en serai servi pour démontrer le mouvement d'un courant sous l'influence d'un aimant, il sera, par

Digitized by Google

là même, également démontré que le même courant prendra naissance dans le conducteur si ce dernier est contraint mécaniquement à effectuer le même mouvement.

Il demeure toutefois bien entendu que « le déplacement relatif *d'un courant* causé par la présence d'un aimant » veut dire « déplacement *du conducteur* parcouru par le courant ». Une force mécanique agit, en effet, non sur une masse d'électricité, mais seulement sur la substance matérielle qui porte cette masse. La seule force qui puisse s'exercer sur une masse électrique est la force électromotrice (¹).

ROTATIONS ÉLECTROMAGNÉTIQUES.

19. Les lignes de force d'un champ magnétique, telles que les a définies Faraday, sont de l'usage le plus commode lorsqu'on veut concevoir sans difficulté quelles sont les actions réciproques des aimants et des courants. Il faut certainement se garder d'attribuer à ces lignes une existence réelle, de même que, lorsque l'on emploie l'expression de *courant électrique*, il ne faudrait pas donner à croire que l'on a une foi absolue dans l'existence d'un *courant*, au sens propre du mot. C'est un procédé de représentation, de simplification. On amène

(¹) MAXWELL, *Electricity and Magnetism*, t. II, p. 144.

Digitized by Google

ainsi, par voie de comparaison, d'image, les phénomènes abstraits à revêtir une forme familière sur laquelle les raisonnements ont plus de prise.

Les propriétés que Faraday a reconnues aux lignes de force sont, on se le rappelle, les suivantes :

1° Ces lignes tendent à se raccourcir ;

2° Des lignes de force de même sens, placées côte à côte, se repoussent.

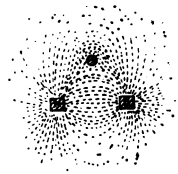
L'aspect d'un champ magnétique quelconque, tel qu'on peut l'obtenir sur une feuille de carton à l'aide de limaille de fer, peut très aisément se prévoir avec le secours de ces deux définitions. La première conduit, comme on l'a vu plus haut, à se figurer une ligne de force comme un fil élastique dont les points fixes sont ceux où elle pénètre dans la masse de l'aimant. Cette ligne vient-elle, par une cause extérieure, à subir un allongement, ses points d'attache tendront à se déplacer jusqu'à ramener la ligne de force au minimum de longueur que comportent les conditions générales du système.

20. La *fig.* 10 montre l'exemple d'un champ de l'action magnétique sur un courant. N et S sont les deux pôles d'un aimant situé au-dessous d'un fil métallique perpendiculaire au plan de la figure et faisant partie d'un circuit fermé. Le courant qui traverse ce conducteur, d'arrière en avant, détermine un champ magnétique dont les lignes de force sont en projection des circonférences concen-

Digitized by Google

triques au fil. Les champs magnétiques de l'aimant et du courant réagissent l'un sur l'autre, et leurs lignes de force se distribuent de manière que, en définitive, leur tendance répulsive fasse équilibre

Fig. 10.



à leur tendance à se raccourcir. La simple inspection de ce fantôme magnétique montre quel sera le mouvement relatif de l'aimant et du conducteur. Les lignes de force qui contournent ce dernier agissent de façon à le diriger vers le bas de la figure. Si le courant était, au contraire, dirigé d'avant en arrière, le conducteur serait sollicité à se déplacer en sens inverse.

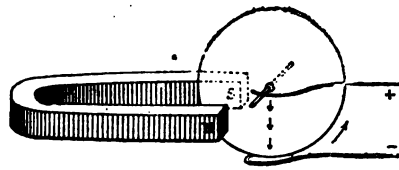
Il importe de remarquer que ces déplacements obéissent aux règles d'Ampère : si le courant est personnifié par un observateur traversé par lui des pieds à la tête, la position d'équilibre vers laquelle tend le système est celle où l'observateur verra le pôle austral de l'aimant à sa gauche et le pôle boréal à sa droite.

Le principe de cette expérience n'est autre que celui de la roue de Barlow et du disque tournant de Faraday.

Digitized by Google

Les *fig.* 11 et 12 montrent justement la roue de Barlow et le disque tournant de Faraday. Il suffit

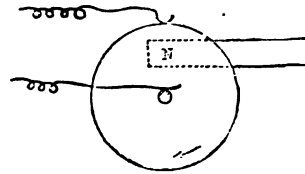
Fig. 11.



de les examiner un instant pour y retrouver tous les éléments de la *fig.* 10 et par conséquent pour en comprendre le jeu.

23. Réciproquement, si le conducteur est déplacé mécaniquement du haut en bas de la figure, il deviendra le siège d'un courant dirigé d'avant en

Fig. 12.



arrière, et, s'il est déplacé de bas en haut, le courant sera de signe contraire. On appelle ces courants *courants d'induction.* Leur tension est proportionnelle au nombre de lignes de force coupées par le conducteur en des temps égaux. Le nombre de ces lignes sert à définir l'intensité d'un champ ma-

Digitized by Google

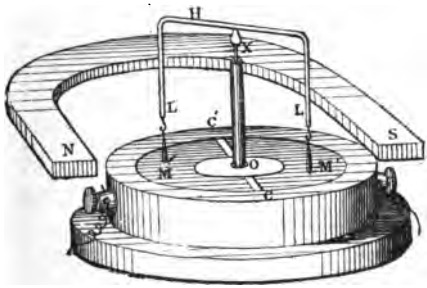
gnétique en ses diverses régions. On peut dire ainsi (*voir* n° 6) que l'intensité en un point est proportionnelle à la densité des lignes de force en ce point. Il s'ensuit que la vitesse du déplacement du conducteur devra être d'autant plus grande pour engendrer un courant de force électromotrice constante que ce déplacement s'effectuera dans une région moins intense du champ magnétique.

Ces considérations vont me suffire pour exposer les divers trains mobiles dont le dernier terme constitue la machine magnéto-électrique de Gramme.

Premier système.

22. Cet appareil consiste (*fig.* 13) en un conducteur métallique deux fois recourbé à angle droit,

Fig. 13.



porté par son milieu sur la pointe d'un axe vertical X, l'axe de rotation du système. Les branches

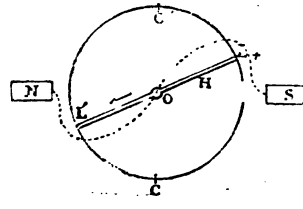
Digitized by Google

verticales L et L′ plongent par leurs extrémités dans un canal circulaire contenant du mercure MM′. Les cloisons d'ébonite *c* et *c′* divisent ce canal en deux parties égales auxquelles aboutissent, par deux bornes, les rhéophores d'une pile. Afin que l'appareil ne trébuche pas, pendant la rotation, lorsque les cloisons *c* et *c′* sont rencontrées par ses branches, celles-ci sont terminées par de petits appendices articulés qui se soulèvent facilement à leur passage sur chaque cloison, pour retomber aussitôt dans le mercure adjacent.

Plaçons cet appareil dans le champ magnétique d'un aimant NS, de telle sorte que le diamètre *cc′* soit perpendiculaire à la droite qui joint les pôles. Le conducteur se mettra à tourner autour de son axe aussi longtemps qu'il sera traversé par le courant de la pile.

La *fig.* 14 montre la disposition en plan.

Fig. 14.



Pour expliquer cette rotation, j'examinerai successivement :

Digitized by Google

1° L'influence des branches verticales L et L′;

2° Celle du fil horizontal H qui relie ces deux branches l'une à l'autre.

23. *Action des branches* L *et* L′. — La *fig.* 14 représente schématiquement la projection horizontale de l'appareil. La flèche qui accompagne le fil H indique la direction du courant dans ce fil et par conséquent dans les branches verticales.

L'examen du fantôme magnétique montre immédiatement que le fil L tend à se déplacer vers le bas, et le fil L′ vers le haut de la figure. Ces fils trouveront ainsi leurs positions respectives d'équilibre en *c* et en *c*′. Mais, par son inertie même, le train mobile dépassera cette position. Chaque branche franchira la cloison d'ébonite et se trouvera aussitôt en contact avec le canal de mercure opposé à celui qu'elle vient de quitter. Les conditions premières d'équilibre sont alors renversées; c'est L qui cherche à atteindre *c*′, et L′ qui se rapproche de *c*. A chaque demi-tour, la commutation du courant se produira au moment où le système mobile franchit sa position d'équilibre. Le mouvement est donc continu, et la rotation s'effectue dans le même sens.

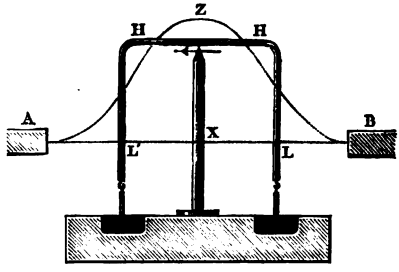
Action du fil H. — La *fig.* 15 montre une projection verticale du même appareil. Une ligne de force AZB passe en avant de L′ dans la première moitié de son parcours, et revient atteindre le pôle B en passant derrière L. La branche horizontale

Digitized by Google

est donc soumise à deux actions de la part de cette ligne de force :

1° Cette ligne, rendue gauche par le courant H, tendra pour se raccourcir à devenir plane, et fera pivoter le conducteur horizontal autour de son milieu, jusqu'à l'amener à être perpendiculaire au plan AXB. On voit immédiatement que cet effet s'ajoute à celui des branches verticales qui vient d'être analysé.

Fig. 15.



2° La ligne de force, toujours pour se raccourcir, cherchera à augmenter son rayon de courbure, c'est-à-dire à se rapprocher de la ligne droite AB. Par suite, elle fera effort pour abaisser tout d'une pièce le conducteur H; mais les dispositions mécaniques de l'appareil n'autorisent pas un tel déplacement; la crapaudine sera seulement pressée avec plus de force contre son pivot.

Autrement dit : la première influence n'a que des composantes horizontales, et la seconde qu'une

Digitized by Google

composante verticale de nul effet dans l'application qui nous occupe.

24. Comme, dans cette étude, je ne décrirai que des appareils pivotant sur un axe vertical, je ne tiendrai désormais aucun compte des composantes verticales qui pourront agir sur les circuits mobiles. Je suis donc en droit de supposer que toutes les lignes de force du champ magnétique sont situées dans des plans perpendiculaires à l'axe de rotation, ce qui supprime toute influence des fils horizontaux.

Ces suppositions ont seulement pour but de rendre plus clair l'exposé des divers cas plus complexes qui vont suivre.

Afin de simplifier le langage, j'appellerai :

Diamètre de commutation le diamètre *cc'* des cloisons ;

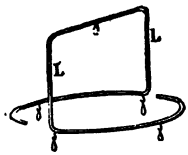
Champ galvanique, le champ magnétique développé par les courants des circuits mobiles, pour éviter de le confondre avec le champ magnétique proprement dit, c'est-à-dire celui des aimants ou électro-aimants fixes.

25. Je puis modifier le train à deux branches de la manière suivante : les fils verticaux sont prolongés à leur partie inférieure par deux arcs de circonférence dont le plan est horizontal. Ces arcs (*fig.* 16) portent, chacun en son milieu, un appendice articulé identique à ceux de L et L'. De cette façon, les canaux de mercure peuvent n'occuper

Digitized by Google

qu'un arc de 90 degrés, au lieu de 180 degrés, sans que le courant cesse jamais de circuler dans le cir-

Fig. 16.



cuit, puisque, aussitôt qu'un appendice abandonnera le mercure, l'appendice suivant continuera ses fonctions.

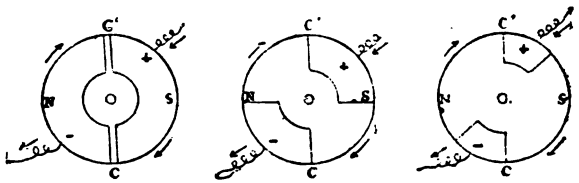
Pour que le conducteur mobile subisse l'influence la plus grande possible, c'est-à-dire, pour qu'un courant donné le fasse tourner avec la plus grande rapidité, il est indispensable de disposer les secteurs mercuriels en des régions déterminées du champ magnétique. Si l'on considère un plan perpendiculaire à la ligne des pôles de l'aimant et passant par l'axe de rotation, que j'appellerai (quoiqu'il ne soit pas le seul) *plan vertical de symétrie du champ magnétique*, le conducteur devra être parcouru par des courants d'un certain signe à droite du plan et de signe contraire du côté opposé. C'est là la condition de meilleur fonctionnement du système. En effet, si d'un même côté de ce plan le conducteur est traversé, dans deux positions différentes, par des courants contraires,

Digitized by Google

les deux effets se combattront; le moment du couple résultant sera donc diminué. De cette condition générale on peut aisément déduire la position la plus favorable des secteurs. La *fig.* 17 montre cette position dans le cas de la rotation rétrograde sous l'influence d'un courant dont le sens est indiqué par les flèches et d'un aimant dont le pôle austral est à gauche.

26. Si, au lieu de deux appendices, les arcs horizontaux de la *fig.* 16 en portent quatre, les canaux de mercure pourront n'occuper que 45 degrés (*fig.* 18), et en général ces secteurs seront d'autant plus courts que le nombre des appendices sera plus grand. Leur emplacement le plus avantageux se détermine facilement. Chacun d'eux doit se trouver tout

Fig. 17. Fig. 18. Fig. 19.



entier d'un même côté du plan vertical de symétrie, et chacun doit reposer contre ce même plan par une de ses extrémités. Si le nombre des appendices augmente de plus en plus, les secteurs finiront par n'occuper que l'espace rempli par les cloisons *c* et *c'* dans la première disposition (*fig.* 19). Les conducteurs mobiles seront d'ailleurs parcourus par

Digitized by Google

un même courant et de la même manière dans les deux cas. Je suis donc amené à appeler encore *diamètre de commutation* le diamètre qui réunit deux arcs de mercure excessivement petits du système actuel.

Nous verrons que cette disposition est celle qui est commandée dans les appareils électromagnétiques les plus importants.

27. Il existe encore une autre variante du premier système, qui réalise un notable progrès, puisqu'elle permet d'obtenir, à l'aide du même courant, une rotation beaucoup plus rapide.

Imaginons (*fig.* 20) un fil enroulé autour d'un cadre rectangulaire semblable à celui d'un galva-

Fig. 20.

nomètre. Les deux extrémités du fil sont munies d'appendices semblables à ceux des appareils précédents. Le cadre peut, en outre, tourner librement autour de l'axe vertical *oo*. Il est facile de voir que tous les fils verticaux concourent à produire les mêmes effets; chacun fournit un couple qui s'ajoute à ceux de tous les autres. Si la résistance

Digitized by Google

électrique du circuit est négligeable par rapport à celle de la pile excitatrice, l'intensité du courant ne sera pas sensiblement modifiée. Le moment du couple résultant sera donc proportionnel au nombre des spires; et, si cette grande longueur de fil n'accroît pas trop l'inertie du système mobile, celui-ci sera animé d'une vitesse considérable par rapport à celle de l'appareil à deux branches, toutes choses égales d'ailleurs.

Dans les divers trains mobiles qui vont suivre, on pourra toujours supposer chacun des fils comme formé d'un faisceau analogue à celui de la *fig.* 10, bien que, pour la clarté des figures et de l'exposition, il ne soit jamais question que d'un conducteur unique. Voilà donc un premier moyen de multiplier les effets électromagnétiques qu'il ne faudra jamais négliger.

Deuxième système.

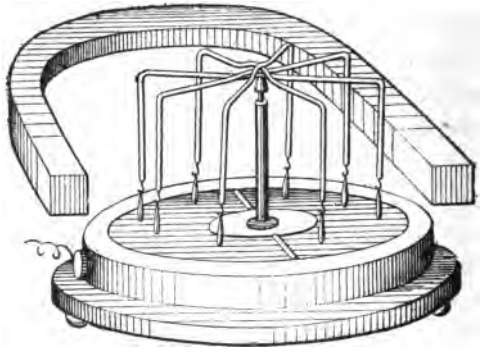
28. Au lieu d'un seul train à deux branches, suspendons sur le même pivot quatre de ces appareils, de telle façon que leurs fils verticaux se trouvent à égale distance les uns des autres, ainsi que le représente la *fig.* 21.

1° Si le mercure s'étend de chaque côté sur un angle de 180 degrés, le nouveau système sera inférieur au précédent (*fig.* 13) comme rendement économique. En effet, chacun des secteurs partage

Digitized by Google

également le courant qu'il apporte entre quatre conducteurs égaux; chacun de ces conducteurs est ainsi parcouru par un courant dont l'intensité est le quart de celle du courant d'un conducteur unique. Le champ galvanique n'est donc ni plus

Fig. 21.



ni moins intense; il est seulement distribué d'une autre manière. Mais la masse de l'appareil mobile est aussi quatre fois plus grande, ses frottements sont augmentés. Cette disposition présente donc sur la précédente un désavantage qui n'est compensé par aucun nouvel avantage.

2° Si les secteurs mercuriels n'occupent qu'un angle de 45 degrés et si leurs milieux sont situés sur la ligne droite qui réunit les deux pôles, les conditions ne sont plus les mêmes. Un seul fil vertical à la fois sera parcouru par le courant de

Digitized by Google

la pile. Le champ galvanique sera aussi intense que dans le premier système; mais il est continuellement amené à réagir sur la région la plus intense du champ magnétique. Son influence est donc mieux utilisée. Si l'inertie du nouvel appareil n'est pas trop augmentée, on conçoit que ce dispositif puisse constituer un perfectionnement.

Nous nous trouvons ainsi conduits à chercher le moyen de modifier les appareils précédents de manière à les faire profiter de ce dernier avantage, à savoir, d'être continuellement amenés à réagir sur la région la plus intense du champ. Au lieu de subir une seule impulsion à chaque demi-tour, le système pourrait alors en subir un grand nombre pendant chaque révolution et acquérir par là une uniformité de mouvement très désirable à tous les points de vue.

Les modes d'enroulement que nous allons maintenant passer en revue réalisent ces conditions et nous font toucher au dernier degré des progrès accomplis dans les rotations électromagnétiques.

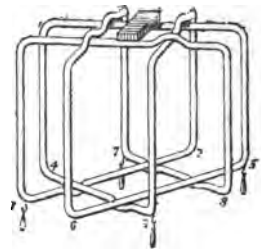
Troisième système.

29. Soit un circuit (*fig.* 22) formé par un seul fil dont les deux extrémités sont soudées l'une à l'autre, de façon à constituer un circuit sans fin. A chaque croisement, les fils sont soigneusement

Digitized by Google

isolés l'un de l'autre. L'enroulement de ce conducteur peut se suivre à l'aide du numérotage des sommets, indiqué sur la figure. Les extrémités inférieures des branches verticales 1 — 3 — 5 — 7 sont terminées par de petits appendices destinés à plonger dans le mercure. L'appareil est d'ailleurs disposé de manière à pouvoir tourner librement autour de son axe de symétrie, lequel axe est vertical. Si le circuit extérieur communique avec les appendices 1 et 5, les fils verticaux qui se trouvent

Fig. 22.



en avant du plan vertical 1.5 seront tous parcourus par des courants d'un même signe, et les fils verticaux situés en arrière du même plan seront tous parcourus par des courants de signe contraire. La résistance électrique d'un pareil circuit ne peut modifier d'une manière sensible l'intensité du courant, car la source voltaïque possède une résistance propre bien spérieure. Le courant qui circule dans un des fils verticaux, considéré

Digitized by Google

isolément, a donc, à très peu près, la même intensité que celui qui traverserait une branche de l'appareil de la *fig.* 13.

Puisque le système actuel possède quatre branches, le champ galvanique mobile sera quatre fois plus intense (avec la même source électrique) que celui de l'appareil à deux branches. Il s'ensuit, si les auges de mercure occupent un arc de 90 degrés, que son action sur le champ magnétique sera plus grande, et qu'on aura ainsi réalisé un système tournant plus rapidement que le train à deux branches, sous l'influence d'un même courant, dans un même champ magnétique. En outre, puisque les secteurs mercuriels fournissent ici un courant pendant chaque quart de tour, les impulsions que reçoit le circuit mobile seront deux fois plus nombreuses que lorsque ces secteurs occupaient un arc de 180 degrés, comme dans le premier système.

Cet enroulement réunit donc deux qualités indépendantes de la source du courant et du champ magnétique, à savoir : rotation plus égale et multiplication du champ galvanique.

Ce mode particulier ne se borne pas à donner le seul circuit que nous venons d'étudier. Au lieu de huit conducteurs verticaux, il est aisé d'en avoir un bien plus grand nombre. Le principe de cet enroulement réside dans l'existence d'un polygone étoilé d'un nombre pair de côtés. De tous ces po-

Digitized by Google

lygones, l'octogone est le plus simple. C'est aussi lui qui a fourni le premier appareil qu'il m'a été donné de réaliser

30. J'ai dit (n° 25) que, pour obtenir les meilleurs effets d'un train mobile, les courants positifs devaient tous se trouver d'un même côté du plan vertical de symétrie du champ. La position la plus favorable des secteurs mercuriels est par conséquent bien déterminée. La *fig.* 19 montre cette position dans le cas d'une rotation semblable à celle des aiguilles d'une montre et du sens du courant indiqué par les flèches. L'appareil est supposé avoir seize fils verticaux; les auges de mercure ne s'étendent alors que sur un angle de 45 degrés. Le sens de l'enroulement n'est pas indifférent. La *fig.* 19 le suppose effectué d'après la *fig.* 22. Autrement, la rotation se produirait en sens inverse.

Pour se rendre compte de cet effet, il suffit de se rappeler l'appareil décrit au n° 25. Si, pour un spectateur placé debout le long de l'axe de rotation (*fig.* 16) et regardant la branche L, l'arc qui prolonge cette branche s'étend à sa gauche, le système tournera de gauche à droite, dans les conditions de champ et de courant de la *fig.* 19. Si, au contraire, le même spectateur voit l'arc à sa droite, la rotation s'effectuera de droite à gauche, dans les mêmes conditions.

Au lieu de seize conducteurs efficaces, nous pouvons en supposer un nombre beaucoup plus

Digitized by Google

considérable. Le mercure des auges n'occupera alors que des arcs de plus en plus petits. A la limite, ces auges se réduiront à des arcs infiniment courts, situés en *c* et en *c'*.

31. Il est possible d'accroître la vitesse de rotation de tous les systèmes que je viens d'exposer. Leur mouvement dépend, en effet, non seulement de l'intensité du courant ou du champ galvanique, mais encore de l'intensité du champ magnétique fixe. Or, il est possible d'augmenter cette dernière dans la région où se meuvent les conducteurs, par la seule introduction d'une armature de fer immobile entre leurs spires.

J'expliquerai plus loin le rôle de ces armatures; pour le moment, je me contenterai de dire que les meilleures conditions seront réalisées si le circuit mobile se meut entre les surfaces aussi rapprochées que possible de l'aimant et de l'armature.

Il existe encore d'autres modes d'enroulements qui permettent de produire les mêmes effets que ceux qui viennent d'être décrits pour le système de la *fig.* 22.

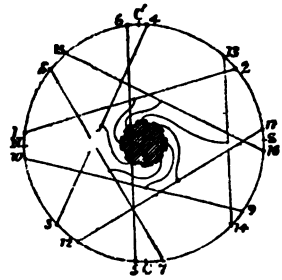
Je vais les passer rapidement en revue.

Solution Alteneck. — Le fil est enroulé longitudinalement sur un cylindre dont la *fig.* 23 représente une des bases. Toutes les spires traversent la base opposée suivant des diamètres. En partant de 1, le fil traverse la base supérieure suivant 1.2, puis revient en 3 par un diamètre de la

Digitized by Google

base inférieure, retourne en 4 au-dessus du cylindre, puis en 5 par un nouveau diamètre sous la face opposée, et ainsi de suite jusqu'à son retour

Fig. 23.



en 1, où le circuit se ferme. La figure montre aussi comment chaque branche transversale est reliée aux huit secteurs métalliques sur lesquels appuient les deux balais frotteurs qui servent à recueillir les courants.

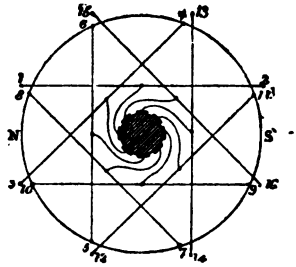
Le diamètre perpendiculaire à CC′ est celui sur lequel se trouvent les points de contact des balais et des secteurs. Les pôles de l'aimant excitateur s'étendent de part et d'autre de ce diamètre.

Solution Frölich. — Les branches transversales inférieures, cachées dans la figure, sont encore, comme tout à l'heure, des diamètres du cylindre. Les branches supérieures sont des cordes représentées en traits pleins. La *fig.* 24 se comprend ainsi d'elle-même.

Digitized by Google

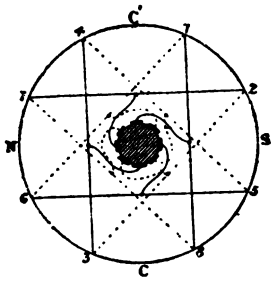
Troisième solution. — Le circuit que j'ai imaginé (*fig.* 25) a été décrit plus haut. Je me bornerai donc à faire remarquer ici que les branches transver-

Fig. 24.



sales inférieures ne sont pas des diamètres, comme dans les systèmes d'Alteneck et de Frölich. Ces branches, représentées en traits ponctués, sont des

Fig. 25.



cordes égales aux branches supérieures. En les reliant aux huit secteurs, comme il est indiqué sur la figure, on voit qu'il est possible d'obtenir un système analogue aux précédents.

Digitized by Google

Il convient de remarquer que cette dernière solution comporte autant de secteurs que les autres, bien que la longueur totale du circuit y soit moitié moindre. C'est là un avantage. En effet, le *desideratum* des machines du genre de celles dont il est question est la production d'un courant continu ; mais on ne peut que s'approcher de ce but : il est impossible de l'atteindre. Pour réaliser les conditions les plus favorables, il faut produire une succession très rapide de courants de même sens. Plus grand sera le nombre de ces courants pendant un temps donné, plus on se rapprochera de la continuité absolue du flux électrique. Il convient donc de chercher à obtenir avec une longueur de fil donnée autant de prises de contact, c'est-à-dire d'intermittences, qu'il est possible. C'est ce que j'ai indiqué dans la *fig.* 25, et c'est ce que MM. Alteneck et Frölich n'ont pas songé à faire, quoique cela n'offrît aucune difficulté. Leur longueur de circuit leur permettait en effet l'emploi de seize secteurs au lieu de huit, en reliant les nouveaux secteurs aux branches transversales inférieures. Dans ce cas, les nouvelles branches conjuguées (c'est-à-dire en communication avec des secteurs diamétralement opposés) seraient, dans la machine Alteneck, 6.7 et 14.15, 2.3 et 12.13, 8.9 et 1.16, 10.11 et 4.5, et, dans la machine Frölich, 2.3 et 10.11, 4.5 et 12.13, 6.7 et 14.15, 8.9 et 1.61. Si ces conditions étaient remplies, les différentes solutions

Digitized by Google

que je viens d'exposer n'offriraient les unes sur les autres aucun avantage ou désavantage, au point de vue de la continuité du courant.

J'ai cherché s'il était possible de trouver encore d'autres circuits capables de remplacer les précédents. Si l'on s'astreint à la condition de n'avoir pas plus de huit fils ou faisceaux longitudinaux avec huit secteurs de contact, il est facile de voir que le problème ne comporte que deux solutions : l'une, indirecte, est celle de Gramme ; l'autre, directe, est la mienne.

Mais, si l'on consent à doubler la longueur du circuit, comme l'ont fait MM. Alteneck et Frölich, il existe encore d'autres solutions que les leurs. J'ai pu en trouver huit nouvelles, et il est probable qu'on en pourrait aisément trouver un plus grand nombre.

Il serait sans intérêt de décrire ici toutes ces solutions ; j'en présenterai seulement une qui me semble préférable à toutes les autres.

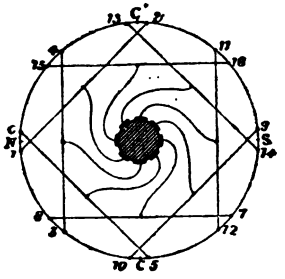
Quatrième solution. — La supériorité de cet enroulement (*fig.* 26) sur les précédents consiste dans l'emploi d'une moindre longueur de fil pour produire les mêmes effets. On réduit par là la chaleur développée dans la bobine par le passage des courants, c'est-à-dire que l'on augmente le coefficient économique de la machine.

Or, les fils que l'on doit chercher à raccourcir sont justement ceux qui se croisent sur les bases

Digitized by Google

du cylindre noyau de la bobine : ce sont donc ceux qui sont visibles sur les *fig.* 23, 24, 25, 26. Les autres parties des conducteurs sont celles qui se projettent suivant les points numérotés; elles sont parallèles à l'axe de rotation, et ce sont elles qui

Fig. 26.



deviennent le siège d'une force électromotrice lorsque la bobine tourne dans un champ magnétique. On peut donc les appeler fils *efficaces*, et appeler fils *inactifs* ceux qui ne servent qu'à relier convenablement, les uns aux autres, tous les fils efficaces.

Dans la *fig.* 26, on voit que les fils inactifs ne traversent les bases supérieures et inférieures que suivant des longueurs respectivement égales au côté du carré et au côté de l'octogone étoilé, inscrits dans ces bases, tandis que, dans les *fig.* 23 et 24, ces mêmes fils sont des diamètres et des côtés d'octogone étoilé.

Digitized by Google

Le tableau qui suit présente les quatre enroulements décrits ci-dessus, dans leur ordre de mérite croissant. La seconde colonne indique en effet la longueur de leurs fils inactifs en fonction du rayon des bases. La longueur des fils efficaces est supposée la même dans tous les cas :

Solution Frölich (*fig.* 15).	30,8
Solution Alteneck (*fig.* 14)	30,5
3e solution (*fig.* 16)	28,4
4e solution (*fig.* 17)	26,0

La quatrième solution est donc la meilleure, et celle de M. Frölich la moins favorable.

ÉCRANS MAGNÉTIQUES.

32. Avant de décrire le quatrième système, je dois donner quelques indications sur ce que l'on nomme les *écrans magnétiques*.

Les deux propriétés fondamentales que Faraday a reconnues aux lignes de force ne permettent pas de se rendre, dans tous les cas possibles, un compte exact et rapide de la distribution de l'intensité d'un champ magnétique.

Il convient, pour cela, d'ajouter :

« Que deux lignes de force d'égale longueur, mais situées dans des milieux différents, ne doivent pas *magnétiquement* être regardées comme également longues. Celle qui se trouve comprise dans une substance magnétique est *magnétiquement*

Digitized by Google

plus courte que celle qui se trouve comprise dans une substance diamagnétique, ou plus généralement dans une substance moins magnétique que la première (¹). »

Cette sorte de scolie permet d'expliquer simplement l'orientation en long et en large d'aiguilles magnétiques ou diamagnétiques sous l'influence d'un aimant. Un corps magnétique est, à certains égards, assimilable en magnétisme à un corps conducteur en électricité. Dans un réseau de fils métalliques de conductibilités différentes, le courant électrique se partage de manière que la plus grande masse d'électricité passe dans les fils de plus grande conductibilité. Dans un champ magnétique, les lignes de force traverseront en abondance les substances les plus magnétiques et sembleront éviter les milieux diamagnétiques, pour être toujours, en fin de compte, les plus courtes possibles.

Si un corps magnétique est libre de se mouvoir autour d'un de ses points, on conçoit que les lignes de force tendent à l'orienter de manière à placer sa plus grande dimension dans leur direction générale. Elles traverseront ainsi ce corps suivant une plus grande longueur. Au contraire, une substance diamagnétique, c'est-à-dire moins magnétique que

(¹) Cette remarque repose sur l'hypothèse ingénieuse de M. Ed. Becquerel, à savoir qu'une substance n'est jamais magnétique ou diamagnétique d'une façon absolue, mais qu'elle peut être l'un ou l'autre, suivant le milieu qui l'environne.

Digitized by Google

le milieu ambiant, serait déplacée de façon à offrir sa plus petite épaisseur à la direction moyenne des lignes de force.

La substance magnétique peut être non seulement mobile autour d'un de ses points, mais encore être libre de prendre un mouvement quelconque. Alors elle sera sollicitée à se placer dans la région la plus intense du champ, afin que le plus grand nombre possible de lignes de force jouissent du privilège de la traverser. C'est pourquoi un morceau de fer viendra, en général, s'appliquer contre l'un des pôles d'un aimant. Au contraire, une substance suffisamment diamagnétique s'écarterait des parties intenses du champ.

En résumé, si l'on tient compte de la remarque ci-dessus, on peut dire que, dans tous les cas, la distribution stable de ces lignes sera établie lorsque leur tendance au raccourcissement fera équilibre à leurs répulsions réciproques.

33. Ces considérations vont me permettre de constater qu'il est possible de modifier un champ magnétique de manière à rendre son intensité aussi faible qu'on le veut dans une région désignée d'avance. Il suffira, pour atteindre ce but, de rendre très rares les lignes qui traversent cette région.

Si les deux extrémités d'un aimant sont situées de part et d'autre d'un cylindre creux de fer entr'ouvert, il sera facile de constater, en prenant un fan-

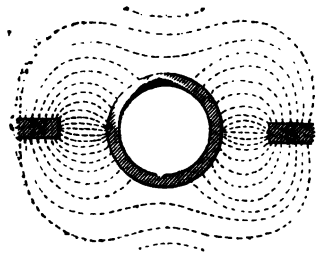
Digitized by Google

tôme magnétique du phénomène, qu'il n'existe que fort peu de lignes de force dans son intérieur.

Le fer est à peu près un million de fois plus magnétique que l'air. Les lignes de force auront donc une tendance considérable à effectuer une partie de leur parcours dans la masse du fer, sous la plus grande longueur possible, et cette tendance réduira notablement l'influence des répulsions parallèles de ces lignes. Le fantôme s'explique ainsi de lui-même.

Si le cylindre est complètement fermé comme dans la *fig.* 27, ces lignes sont encore en plus petit

Fig. 27.



nombre dans son intérieur. Et si l'épaisseur du fer est assez grande, en raison de son immense pouvoir magnétique, on peut même dire qu'elles n'y existent physiquement pas, surtout lorsque la longueur du cylindre est considérable.

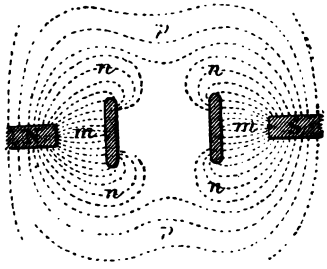
Mais si, au contraire, le cylindre est court et affecte la forme d'un anneau, un certain nombre

Digitized by Google

de lignes de force viendront pénétrer dans son intérieur en contournant ses bords. La *fig.* 28 montre la coupe d'un anneau entre les pôles N et S d'un aimant. L'examen de cette figure me dispense de tout commentaire.

Les *fig.* 27 et 28 font comprendre que l'intérieur d'une sphère de fer suffisamment épaisse ne doit

Fig. 28.



contenir qu'un nombre excessivement petit de lignes de force.

Cette propriété a été mise à profit par sir W. Thomson. Un galvanomètre ne fournit de mesures comparables, qu'autant que la force directrice qui agit sur son aiguille est constante. Les galvanomètres employés à bord des navires porteurs de câbles transatlantiques ne pouvaient donner d'indications utiles, puisqu'ils changeaient sans cesse de méridien magnétique. Sir W. Thomson surmonta cet obstacle. Il enferma l'appareil dans une enveloppe de fer forgé, qui présentait seulement quelques

Digitized by Google

ouvertures pour permettre d'observer les déviations de l'aiguille. La force directrice était fournie par un aimant spécial, situé à l'intérieur de l'enveloppe et solidaire de celle-ci.

34. Si, au lieu d'être en fer, le cylindre des *fig.* 27 et 28 était constitué par une substance diamagnétique, le champ offrirait une image toute différente; mais on n'a encore trouvé à aucun corps un pouvoir diamagnétique comparable à celui du fer. L'effet perturbateur de la substance la plus diamagnétique que l'on connaisse, le bismuth, est pour ainsi dire inappréciable dans un fantôme produit avec de la limaille de fer.

35. On possède ainsi le moyen de réaliser de véritables écrans magnétiques. Par contre, ainsi que nous allons le constater, il est également facile d'augmenter l'intensité du champ dans une région donnée. Lorsque l'anneau de fer est retiré du champ magnétique des *fig.* 27 et 28, les lignes de force ne subissent plus leur tendance à traverser l'armature et cèdent à l'influence de leurs répulsions mutuelles. Elles s'écartent l'une de l'autre et prennent une distribution d'équilibre différente de la première. La présence de l'armature en fer doux avait donc accru l'intensité du champ entre sa propre surface et celle des aimants, et plus ces surfaces seront rapprochées, plus sera grand le nombre de lignes de force dont elles modifient la courbure pour les concentrer dans l'espace qui les sépare.

Digitized by Google

La forme annulaire de l'armature n'a ici aucune importance. C'est sa surface extérieure seule qui se trouve en jeu. Ainsi, pour exalter l'intensité du champ magnétique d'une manière avantageuse dans les appareils de rotation décrits précédemment, il faudra placer leurs conducteurs entre les pôles excitateurs et une masse de fer doux. Le meilleur effet sera obtenu lorsque l'espace qui sépare l'armature et les aimants sera réduit à son minimum. On devra donc ne laisser que juste l'intervalle nécessaire au passage du circuit mobile. Le nombre des lignes de force qui influencent le circuit sera ainsi beaucoup plus considérable que si l'armature était absente. Comme je l'ai dit au n° 31, ce procédé de multiplication des actions électro-magnétiques est applicable à tous les systèmes que j'ai passés en revue.

36. *Écrans magnétiques en mouvement.* — J'avais éte amené, par diverses considérations, à penser qu'une masse de fer qui se meut uniformément dans un champ magnétique constant n'entraîne pas les lignes de force de ce dernier. Elle leur fait seulement subir une déformation permanente, dont la valeur dépend de la vitesse du mouvement, d'une part, et, d'autre part, de la raideur de ces lignes, c'est-à-dire de l'intensité du champ.

Une expérience élégante de M. G. Lippmann (¹)

(¹) Société de Physique, 3 janvier 1879.

Digitized by Google

est venue confirmer cette manière de voir, de la façon la plus nette, en permettant d'établir qu'une armature de fer cesse de remplir ses fonctions d'écran dès qu'elle est animée d'un mouvement de translation. Ce fait intéressant peut d'ailleurs se concevoir aisément.

Soit un anneau de fer situé dans un champ magnétique que, pour plus de simplicité, je supposerai d'abord constant dans toute son étendue. On a vu plus haut qu'un certain nombre de lignes de force, suffisamment voisines de l'anneau, seront infléchies et le contourneront suivant un arc de sa circonférence. La constance du champ entraîne une symétrie complète par rapport au plan méridien de l'anneau, parallèle aux lignes de force, et cela dans toute position de l'anneau. Or, déplaçons celui-ci de façon que son arc supérieur contienne N nouvelles lignes, il est évident que son arc inférieur en abandonnera une égale quantité. Mais chacun de ces arcs doit toujours, à l'état statique, recéler le même nombre de lignes de force. Il a donc fallu que, au moment où une nouvelle ligne s'introduisait dans l'arc supérieur, une ligne abandonnât ce même arc pour aller remplacer dans l'arc inférieur celle que ce dernier venait de perdre. Alors seulement la symétrie existe, et l'on doit en conclure qu'une ligne de force a dû traverser la région interne de l'anneau.

Ainsi, lorsque le champ se déplace par rapport

Digitized by Google

à la bague de fer, toutes les parties de ce champ qui sont comprises dans l'intérieur de cette bague sont traversées par autant de lignes de force que si l'anneau était supprimé ; mais, si la quantité des lignes est la même dans les deux cas, la qualité de leur passage est différente. A l'intérieur de la bague, ces lignes sont animées d'une grande vitesse et elles n'apparaissent qu'à des intervalles de temps relativement longs.

C'est ainsi qu'une masse liquide qui s'écoule dans des conduites prend aux sections étroites une vitesse plus considérable que dans les larges sections, de manière que, en définitive, le débit soit le même en chaque point.

Si le champ magnétique n'était pas constant, les vitesses de passage des lignes de force seraient inégales pendant un déplacement uniforme de l'anneau. C'est la seule modification qu'il y aurait à introduire dans les précédentes explications.

37. Il nous est possible maintenant de déterminer dans quel cas une masse de fer mobile ou fixe remplira ou non l'office d'écran. Si l'anneau de fer considéré ci-dessus tourne autour de son axe de symétrie, il continuera, malgré son mouvement de rotation, à abriter sa région interne de toute influence magnétique, puisqu'il occupera constamment les mêmes points de l'espace.

Mais, si le déplacement dont il est animé est une translation ou, plus généralement, une rota-

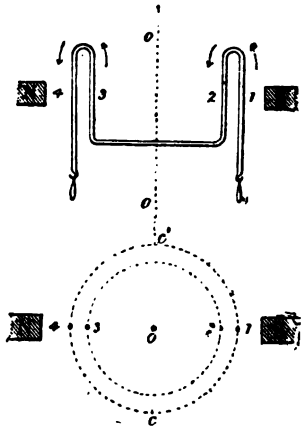
Digitized by Google

tion autour d'un axe différent de son axe de symétrie, les conditions ne sont plus les mêmes : aucune partie du champ n'échappera à l'action des lignes de force.

QUATRIÈME APPAREIL (CIRCUIT GRAMME).

38. Cherchons à répéter les expériences de rotation électromagnétique à l'aide du conducteur représenté dans la *fig.* 29, en élévation et en plan.

Fig. 29.



Si un courant de pile parcourt ce conducteur en passant successivement par les fils 1, 2, 3 et 4, les fils 1 et 2 seront le siège de courants contraires ; par conséquent, leurs réactions sur le champ ma-

Digitized by Google

gnétique fixe seront également de signe contraire. Si le fil 1 est sollicité à se déplacer de gauche à droite, le fil 2 tendra à se mouvoir de droite à gauche.

Comme les conducteurs 3 et 4 jouent dans la seconde moitié du champ le même rôle que les premiers, il s'ensuit que deux couples de sens contraire agissent sur le système mobile. En appelant D la distance qui sépare les fils extérieurs 1 et 4, et D′ celle qui sépare les fils 2 et 3, le premier couple a pour moment + FD, et le second — F′D′. La force F dépend de l'intensité du courant et de celle du champ magnétique. La première est la même pour tout le circuit, et je supposerai la seconde constante dans toute l'étendue occupée par l'appareil pendant sa rotation. Il s'ensuit que $F = F'$. On voit ainsi immédiatement que, si $D = D'$, le système restera immobile, quelles que soient les intensités des champs magnétique et galvanique. Si $D > D'$ (c'est le cas de la figure), la rotation s'effectuera dans le sens de la force F, et sous une influence d'autant plus grande que la différence entre D et D′ sera plus accusée. Si enfin $D' = 0$, le couple FD agira intégralement, et nous sommes ramenés au cas du premier train mobile de la *fig.* 13.

Ce qui empêche le système actuel de subir toute l'action du couple + FD lorsque D′ n'est pas nul, c'est l'influence du champ magnétique sur les fils internes 2 et 3. S'il était possible de soustraire ces

Digitized by Google

derniers conducteurs à cette influence, le couple — F′D′ serait annulé, puisque F′ serait nul. Or, une bague de fer occupant l'espace annulaire compris entre les deux circonférences de rayon 01 et 02 permet d'atteindre ce but. Cette armature réalise, en effet, un écran magnétique à l'égard des fils 2 et 3.

39. Bien que nous ayons défini ces écrans, analysons en détail le cas qui se présente ici.

La *fig.* 28 nous montre le fantôme magnétique pris suivant une coupe diamétrale de l'anneau. On y reconnaît trois groupes de lignes de force dont les formes sont notablement différentes.

1° *Le groupe m.* — Ces lignes, qui sont de beaucoup les plus nombreuses, partent des pôles pour aboutir directement, presque en ligne droite, dans les parties de l'anneau situées en regard de ces pôles.

2° *Le groupe n.* — Celles-ci, en bien moins grand nombre que les précédentes, semblent d'abord éviter l'anneau; elles en contournent la tranche et reviennent, en se recourbant sur elles-mêmes, pénétrer dans sa surface interne.

3° *Le groupe p.* — Ces lignes ne rencontrent l'anneau en aucun point de leur parcours et sont toutes situées au-dessus ou au-dessous de lui.

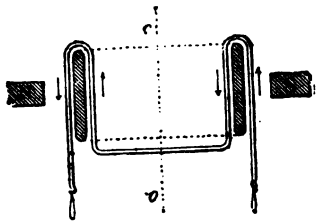
Il est à remarquer qu'aucune ligne ne traverse l'anneau de part en part pour passer directement d'un pôle à l'autre.

Digitized by Google

Si la longueur de l'anneau est très grande, le groupe *m* seul représente un champ magnétique de quelque importance. Les groupes *n* et *p* deviennent alors tout à fait négligeables. Mais, dans l'espèce, nous considérons une bague d'une hauteur inférieure à son diamètre. Nous devons donc tenir compte des deux derniers groupes. Nous allons voir que le second *n* conspire à produire les mêmes effets que le premier *m*, quoique avec moins d'intensité. Quant au troisième *p*, il n'intervient en rien dans les phénomènes de rotation, puisque ces lignes ne sont coupées en aucun point par les conducteurs mobiles.

40. Disposons le circuit de la *fig.* 29 de telle sorte que les fils 1 et 4 soient extérieurs à l'anneau et que les fils 2 et 3 lui soient intérieurs (*fig.* 30),

Fig. 30.



et recherchons, dans ces conditions nouvelles, quels seront l'action et le sens des couples qui s'exercent séparément sur les systèmes 1.4 et 2.3. Le rôle de la bague de fer, à l'égard du système 1.4, n'est

Digitized by Google

autre que celui d'une armature ordinaire qui augmente l'intensité du champ, ainsi qu'il est dit au n° 31.

Le moment du couple $+ FD$ est donc devenu $+ F_1 D$, F_1 étant plus grand que F.

Quant au couple $- F'D'$, il est complètement modifié. Ce sont les lignes du groupe *n* qui sont coupées par le fil 2. Or, ces lignes semblent, pour ce conducteur, provenir d'un pôle boréal B′ situé à sa gauche; et, si l'on tient compte de ce que, ici, le courant est descendant, on verra sans peine que le fil 2 tend à se déplacer d'arrière en avant de la figure. On trouverait que le fil 1 est sollicité à se mouvoir de la même manière, car le courant qui le parcourt est ascendant et le pôle austral est à sa gauche.

Ainsi, la présence de l'anneau de fer a changé le signe du couple interne et en a diminué la valeur absolue; d'autre part, elle a augmenté la valeur du couple externe en lui conservant son signe; et cela, quelque petite que soit la distance radiale des fils 1 et 2.

Le système sera soumis à l'action des deux couples du même signe $+ F_1 D$ et $+ f D'$. Il se mettra donc à tourner de gauche à droite. C'est ce que l'expérience confirme avec la plus grande netteté.

24. On a vu (n° 37) que, si l'anneau de fer est entraîné dans une rotation autour de son axe de figure, il remplit exactement les mêmes fonctions

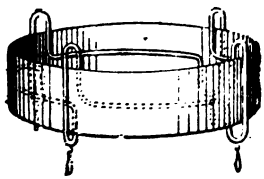
Digitized by Google

magnétiques que s'il est immobile. Nous pouvons donc supposer, dans l'appareil qui précède, la bague de fer doux solidaire du circuit, et rien ne sera changé dans les effets que nous venons d'analyser.

Sous cette dernière forme, il est possible de réaliser une multiplication de l'appareil de la *fig.* 30, qui présente les mêmes avantages que les enroulements des *fig.* 22, 23, 24, 25 et 26. Nous arrivons ainsi à une sorte de schéma de la machine de Gramme.

La *fig.* 31 montre un anneau de fer doux sur lequel a été enroulé, en quatre spires équidistantes,

Fig. 31.



un fil métallique isolé dont les extrémités sont réunies l'une à l'autre de manière à constituer un circuit sans fin. Les parties inférieures de chacune des spires sont munies d'appendices articulés destinés à plonger, comme plus haut, dans des rhéophores de mercure. Tout le système est libre de tourner autour de son axe de symétrie.

Les fils verticaux extérieurs et intérieurs à l'anneau exercent des actions identiques quant à leur

Digitized by Google

signe; la rotation s'expliquera absolument comme au n° 30.

Au lieu de quatre spires, on pourrait en supposer six, huit, etc.; l'étendue des secteurs mercuriels devrait seulement être réduite en proportion de leur nombre.

Machines magnéto-électriques qui se déduisent des appareils précédents.

Roue de Barlow.

42. J'ai rappelé (n° 20) que l'expérience de la *fig.* 10 donne le principe de la roue de Barlow.

Disque tournant de Faraday, Disque de Foucault, Machine de M. Le Roux.

Toutes ces applications ne sont que des formes très peu différentes de la roue de Barlow, en tenant compte de la réversibilité à laquelle cette dernière donne lieu.

Machine à double T *de Siemens, Machine de Wilde.*

L'appareil décrit au n° 27 (*fig.* 20) représente cette machine avec la plus grande exactitude, quoique considérée dans sa fonction inverse, celle d'électromoteur. Pour en faire une véritable machine de Siemens ou de Wilde, il suffit de donner au circuit

Digitized by Google

une hauteur très grande par rapport à son diamètre et d'introduire une armature de fer doux dans le cadre de la bobine. Cette armature est solidaire du circuit. Cette solidarité est d'ailleurs commandée, non par la théorie, mais par la pratique.

Machine de Gramme, Machine d'Alteneck.

J'ai indiqué, dans le cours de cette étude, quels sont les appareils qui, parachevés, donnent naissance à ces deux dernières machines. Chacun des fils des *fig.* 22 et 31 est remplacé par un véritable écheveau semblable à celui du n° 27 (*fig.* 20). Les contacts fixes, au lieu d'être des auges de mercure, sont des frotteurs métalliques pressés sans cesse sur la jante d'une sorte de rhéotome. Les parties métalliques de ce rhéotome correspondent respectivement aux écheveaux dont il vient d'être question, de la même manière que les appendices articulés des appareils de rotation communiquent avec les spires de leur circuit.

43. On peut admettre que les fils extérieurs à l'anneau de fer, dans la bobine Gramme, et les fils parallèles à l'axe de rotation, dans les autres bobines, soient seuls à considérer pour la production du courant. En effet, les fils internes dans la première et les fils radiaux dans la seconde ne sont coupés que par un nombre relativement peu con-

Digitized by Google

sidérable de lignes de force. Or, dans ces conditions, si les dimensions de la bobine, le nombre et le diamètre des fils, leur nature, le champ magnétique et la vitesse de rotation sont les mêmes, la même force électromotrice sera développée dans les deux circuits. Celui d'entre eux qui sera le moins long sera donc le siège du courant le plus intense d'après la formule connue d'Ohm :

$$I = \frac{E}{R}.$$

En appelant d le diamètre et e l'épaisseur d'une bobine Gramme ou Alteneck, la longueur du fil nécessaire à la confection d'une spire complète est, dans la bobine Gramme

$$4e\,(^1),$$

et, dans la bobine Alteneck,

$$2(e+d),$$

si l'on ne tient pas compte de la longueur additionnelle des fils qui résulte de leur superposition sur les deux bases circulaires de l'anneau.

En conséquence de ce qui précède, si

$$4e < 2(e+d),$$

la machine de Gramme sera la plus avantageuse, et si

$$4e > 2(e+d),$$

(1) La spire complète, dans l'anneau Gramme, doit se composer de deux spires diamétralement opposées pour se comparer à une spire de l'anneau Alteneck.

Digitized by Google

elle sera inférieure à celle d'Alteneck; si enfin

$$4e = 2(e + d),$$

les deux machines fourniront des courants identiques.

Cette dernière équation étant équivalente à

$$e = d,$$

on voit que, suivant que l'épaisseur de la bobine sera plus petite ou plus grande que son diamètre, la machine de Gramme sera supérieure ou inférieure à celle d'Alteneck.

Dans la pratique, à cause de la grande vitesse de rotation que l'on donne aux bobines (800 à 900 tours par minute), les bobines les plus aplaties présentent le plus de garanties de durée. Pour obtenir le maximum d'effet d'une machine donnée, il faut que la surface extérieure du circuit se meuve aussi près que possible des surfaces polaires fixes, et l'on peut arriver à réduire cet intervalle à 1 ou 2 millimètres à peine. Pour peu que la force centrifuge écarte les fils de la bobine, ceux-ci viennent frôler le fer des électro-aimants, et sont aussitôt dénudés et souvent coupés, ce qui nécessite une réparation de la machine. Il est clair que plus la longueur de ces fils sera grande, plus grands aussi seront les risques d'avarie. Aussi doit-on envelopper de place en place les bobines longues, à l'aide de bandes de toile fortement serrées, qui soient capables de s'opposer à la force qui tend à

Digitized by Google

soulever les fils. Mais ces bandes ont une certaine épaisseur propre qui oblige à reculer d'autant les surfaces polaires : ce qui diminue considérablement l'intensité du champ magnétique. Les bobines les plus plates doivent donc être préférées aux bobines larges ; l'axe de rotation se trouve pour les premières être leur axe principal d'inertie, ce qui ajoute encore à l'avantage qu'elles présentent. Ces considérations portent à regarder la machine Gramme comme supérieure à la machine Alteneck.

Néanmoins, cette dernière, sous sa forme la plus perfectionnée, a pu lutter avec une machine Gramme, du type le plus primitif il est vrai, comme l'a fait connaître un Rapport de M. Tyndall.

Dans des expériences comparatives, entreprises en mai 1878, par le Comité de l'Institut Franklin, à Philadelphie, sur une machine de Gramme et sur diverses machines magnéto-électriques (*Brush machine* et *Wallace-Farmer machine*) [1], il a été d'ailleurs établi que la machine de Gramme était la source de courant la plus économique. Il est regrettable que M. Alteneck n'ait pu soumettre une de ses machines à ces épreuves.

[1] La machine *Wallace-Farmer* ne diffère en rien de celle de M. Niaudet. La *Brush machine* est une sorte de machine de Wilde multiple.

Digitized by Google

III

DESCRIPTION

DE LA MACHINE DE GRAMME

Nous allons maintenant nous occuper plus particulièrement de la machine de Gramme, dont le jeu sera des plus aisés à comprendre grâce à celui des appareils précédents.

Machine de laboratoire. — La machine de Gramme représentée *fig.* 32 se compose d'un circuit circulaire spécial capable de tourner autour de son axe entre les pôles d'un aimant fixe.

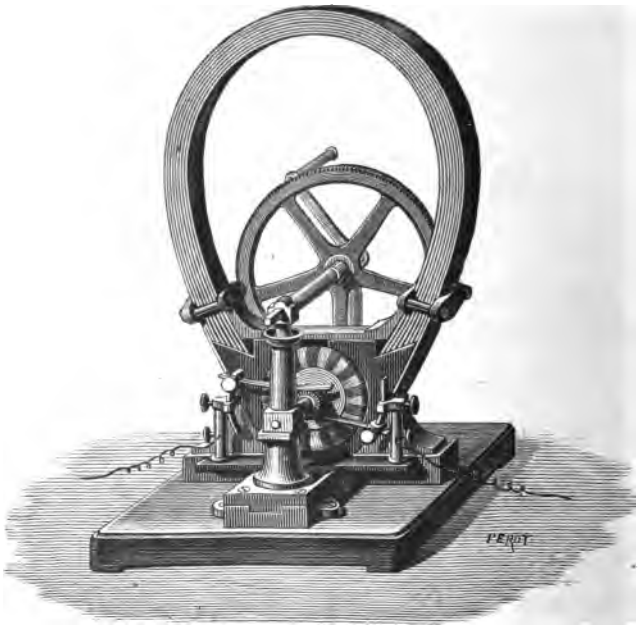
Bien que la *fig.* 31 ait déjà montré une sorte de squelette du circuit mobile, nous croyons utile de le décrire avec plus de détails en le présentant sous la forme que lui donnent généralement les constructeurs.

Un certain nombre de bobines (*fig.* 33) sont embrochées sur un même anneau circulaire en fer. Chaque bobine est reliée à la suivante de manière

Digitized by Google

à prolonger son mode d'enroulement, mais cela par l'intermédiaire d'une pièce métallique *c;* il existera donc autant de pièces *c* qu'il y a de bo-

Fig. 32.

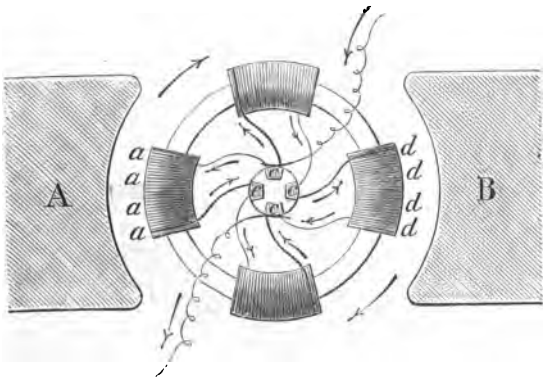


bines. Ces pièces *c*, appelées collecteurs, sont isolées les unes des autres et disposées autour d'un axe qui tourne en même temps que le système des bobines et de l'anneau de fer. Deux frotteurs diamétralement opposés s'appuient sur elles, le dia-

Digitized by Google

mètre de leur point de contact étant perpendiculaire à celui des pôles A et B de l'aimant fixe. Dans les conditions de la figure, si le mouvement de rotation s'effectue dans le sens de celui des aiguilles d'une montre, la bobine de gauche sera parcourue par des courants extérieurs ascen-

Fig. 33.



dants *a*, *a*, *a*, *a*, et celle de droite par des courants descendants *d*, *d*, *d*, *d*, par rapport au plan de la figure. Les flèches indiquent le sens de ces courants et montrent que les deux moitiés de l'anneau fournissent des courants qui s'ajoutent dans le circuit extérieur qui réunit entre eux les deux frotteurs.

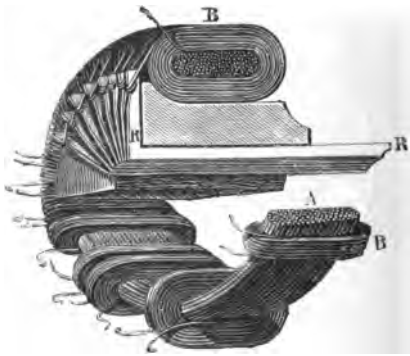
Entre ces quatre bobines, on en pourrait intercaler quatre nouvelles de manière à couvrir com-

Digitized by Google

plètement l'anneau de fer; chaque bobine donnera lieu à une pièce de contact *c* et chaque pièce de contact à un courant. Il y aura donc autant de courants successifs qu'il y a de bobines ou de collecteurs. La *fig.* 34 montre une bobine avec ses collecteurs en partie confectionnée.

On pourrait encore augmenter le nombre des

Fig. 34.

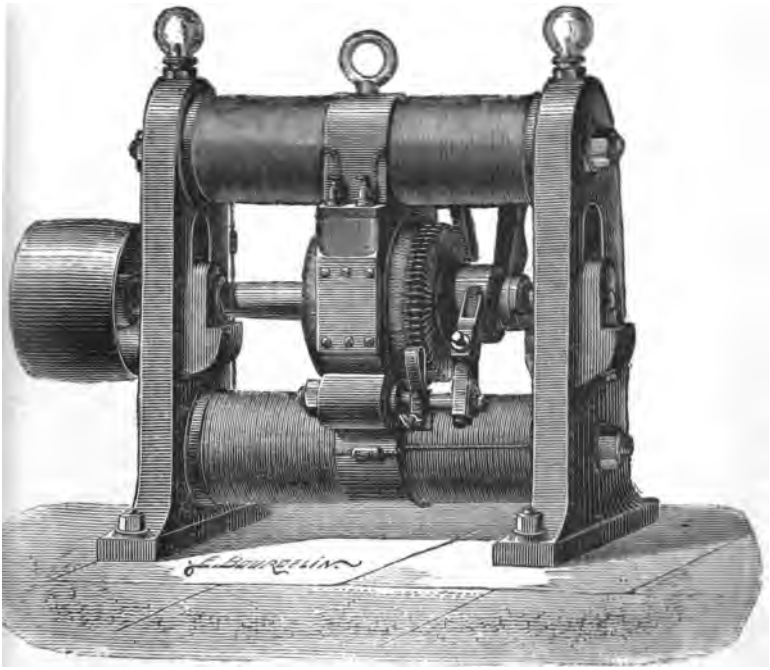


bobines dans une proportion quelconque, pourvu que ce nombre fût pair. Les machines employées le plus souvent dans les laboratoires de physique (*fig.* 32) contiennent en général 30 collecteurs, c'est-à-dire trente bobines. On produit donc 30 courants par tour, et comme on peut obtenir plus de 1000 tours par minute, on donne ainsi naissance à 30000 courants par minute, soit 500 par seconde.

Digitized by Google

Machine à lumiere. — Dans les machines de plus grandes dimensions qui servent à l'éclairage électrique. le nombre des collecteurs s'élève à 60, et, la vitesse normale de l'anneau étant de 900 tours à la minute, c'est 54 000 courants que l'on produit pendant le même temps.

Fig. 35.



La *fig.* 35 montre une de ces machines. L'ai-

Digitized by Google

mant permanent s'y trouve remplacé par un électro-aimant excité par le courant même de l'anneau, ce qui permet d'obtenir des effets d'une puissance considérable, moyennant une force motrice suffisante.

Les deux modèles les plus couramment en usage pour actionner des régulateurs ou lampes électriques nécessitent, le premier un cheval-vapeur, le second 2,5 chevaux-vapeur.

FIN

Digitized by Google

TABLE DES MATIÈRES

INTRODUCTION. 1

I. — **Étude comparée des aimants et des courants.** 5

Aimants. 6
Courants. 15
Influence réciproque des aimants et des courants. . . 20

II. — **Théorie de la machine de Gramme** 26

Rotations électro-magnétiques 29
Premier système 33
Deuxième système 41
Troisième système 43
Solution Alteneck. 47
Solution Frölich. 48
Solution de M. Breguet 49
Écrans magnétiques. 53
Quatrième appareil (circuit Gramme). 62
Machines magnéto-électriques qui se déduisent des appareils précédents. 68
Roue de Barlow. 68
Disque tournant de Faraday, disque de Foucault, machine de M. Le Roux 68
Machine à double T de Siemens, machine de Wilde. . . . 68
Machine de Gramme, machine d'Alteneck. 69

III. — **Description de la machine de Gramme**. . . . 73

Machine de laboratoire. 74
Machine à lumière. 77

Paris. — Imp. Gauthier-Villars, 55, quai des Grands-Augusiins.

Digitized by Google

Digitized by Google

Digitized by Google

Digitized by Google

Digitized by Google

Digitized by Google

MAY 1 0 1890
MAY 29 1889

Digitized by Google

MAY 1 0 1890

MAY 29 1898

Digitized by Google

Eng 4038.80
La machine de Gramme, sa theorie e
Cabot Science 004662930
3 2044 091 855 965

Digitized by Google